

GNSS 衛星信号を用いた土壌水分推定手法の開発

Development of soil moisture estimation method using GNSS satellite signals

○齊藤忠臣¹⁾・門田直哉^{2) 3)}・山田千翔⁴⁾・藤巻晴行⁵⁾・猪迫耕二¹⁾・登尾浩助⁶⁾・森也寸志⁷⁾

○Tadaomi Saito¹⁾, Naoya Kadota^{2) 3)}, Chika Yamada⁴⁾, Haruyuki Fujimaki⁵⁾,

Koji Inosako¹⁾, Kosuke Noborio⁶⁾ and Yasushi Mori⁷⁾

1. はじめに

土壌水分は多分野において重要なパラメータの一つであるものの、空間変動性が高いため、実用性の高い「面」での測定手法の開発が求められている。Larsonら(2008)はGPS衛星から飛来する電波を用いて土壌水分を推定するGNSS-IR(Interferometric Reflectometry)という手法を提案した。GNSS-IRとは、GNSS受信機に到達する衛星からの直接波と間接波(地表面反射波)の複合信号(マルチパス)データを解析することで、土壌水分を推定する手法である。通常、GNSS-IRに関する研究では、高精度・高価なGNSS信号受信システムが用いられているが、本手法を市販の安価なパーツを組み合わせたシステムに適用できれば、途上国を含む世界中での普及が見込める。そこで本研究では、圃場に安価なGNSS信号受信システムを設置し、得られるマルチパスデータの解析から土壌水分を推定する手法を開発することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 圃場観測:鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンター圃場(54×60 m)にて観測を行った(Fig.1)。圃場中央付近にアンテナ高1.6 mのGNSS信号受信システムを2台設置した。GNSS受信システムはいずれも受信機とマイクロコンピュータ(Raspberry Pi 3 Model A+, ラズベリーパイ財団)を組み合わせたものである。それぞれに異なる受信機を設置しており、1台にはL1帯の信号のみを受信する受信機(GU-902MGG-USB, YIC社)、もう1台にはL1帯に加えてL2帯の信号を受信する受信機(ZED-F9P-02B-00, ublox社)を設置した。Python3.9.6を用いて作成したソフトウェアを通じてデータを取得・保存し、Wi-Fiルーターを通じてデータをサーバーにアップロード可能となっている。なお、本システムで得られるデータはNMEAフォーマットであり、データが全て整数値となっている。また、静電容量式の誘電率水分計である5TM(METER社)6本を、GNSS信号の電波の浸透深度に近い表層2.5 cmに設置した。6本のセンサから得られる土壌の体積含水率の平均値を圃場の土壌水分量(θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)として、解析結果との比較に利用した。



Fig.1 観測圃場・機器
Observation field and equipment

2.2 受信信号の解析方法:毎秒取得した衛星データを10秒ごとに間引き、マルチパスの指標である信号対雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)や、衛星仰角などのデータを抽出して解析を行った。また、衛星の軌道を上昇時と下降時に分けて解析を行った。まず、時間と仰角の多項近似式に基づき、整数値で出力された仰角を平滑化(以降 E_{dp} と表記)した。

¹⁾鳥取大学農学部, Faculty of Agriculture, Tottori Univ., ²⁾University of Guelph, ³⁾鳥取大学院, Graduate School of Sustainability Science, Tottori Univ., ⁴⁾大日コンサルタント株式会社, Dainichi Consultant Inc., ⁵⁾鳥取大学乾燥地研究センター, Arid Land Research Center, Tottori Univ., ⁶⁾明治大学農学部, Meiji Univ., ⁷⁾岡山大学環境生命科学研究科, Okayama Univ. キーワード: GPS, 広域土壌水分, マルチパス

次に、SNR 波形を明瞭化するために、仰角との関係を利用してトレンドを除去した。トレンド除去後の反射波の SNR を SNR_r とする。その後、マルチパスの影響が強い仰角 5~18 度の範囲で、得られた SNR_r と E_{dp} の関係を非線形最小二乗法によって式 (1) に当てはめた。

$$SNR_r = A \cos\left(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin E_{dp} + \varphi\right) \quad (1)$$

式 (1) において、 λ は GNSS 信号の波長、 A は振幅、 H は反射体高さ、 φ は位相のずれを表している。本研究では A, H, φ をフィッティングパラメータとした。

フィッティングの精度を Maximal Information Coefficient (MIC) 相関を用いて評価し、MIC 相関が 0.8 以上のデータのみを解析に用いた。各パラメータと 6 本のセンサから得た平均体積含水率を比較し、相関を調べた。解析期間は 2022 年 9 月 16 日~12 月 15 日とした。

結果・考察

4. 結果と考察

本研究では、各 GNSS 衛星群の L1 帯、L2 帯の信号の解析を行った。本要旨では GPS 衛星 24 衛星の L2 信号を用いた解析結果を示す。各 GPS 衛星における A, H, φ と実測平均体積含水率 θ の相関を調べた結果、多くの衛星で反射体高さ H が他 2 つのパラメータよりも強い相関を示した。24 衛星の相関係数の絶対値平均を、パラメータごとに算出したところ、 H における平均値が最も高くなった。 H において特に強い相関 ($|R| \geq 0.6$) を示した衛星をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。 H との相関が強かった 4 衛星は、すべて負の相関を示した。土壌が乾燥しているほど電波の浸透深度は深くなるため、反射体高さ H は理論上、負の相関を示す。したがって、本研究において土壌水分の推定に用いるパラメータを、反射体高さ H とすることとした。4

衛星における H と θ の関係を Fig. に示す。 $R = 0.72$ となり、データ数が多いにもかかわらず強い相関を示した。図中に示した相関式に各データの H を代入して求めた推定体積含水率 θ_e と実測平均体積含水率 θ を比較した結果を Fig. に示す。概ねよい精度で水分変動を推定することができた。

参考文献 Larson *et al.*, (2008): Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies. Geophysical Research Letters, 35

Table 1 強い相関を示した衛星
Strongly correlated satellites

衛星番号	軌道傾向	相関係数	データ数
23	下降傾向	-0.83	75
11	下降傾向	-0.82	33
32	下降傾向	-0.76	23
31	下降傾向	-0.61	65

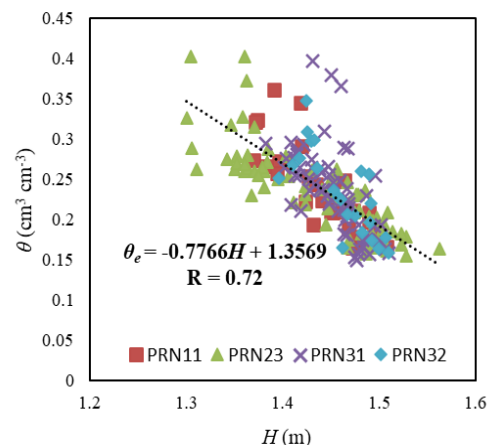


Fig. 2 反射体高さ (H) と実測水分 θ の関係

Relationship between H and θ

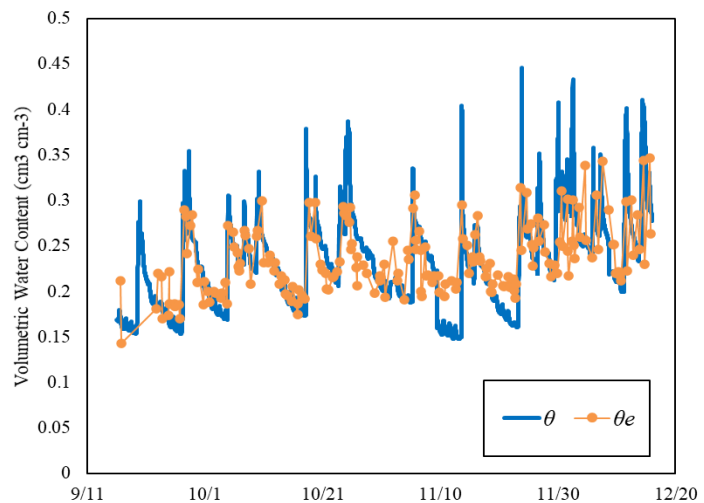


Fig. 3 実測 (θ) および推定 (θ_e) 体積含水率の比較
Comparison of θ and θ_e